

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240618003

红茶菌发酵工艺、菌种及其功能活性研究进展

钱星宇^{1,2}, 乔江涛², 张红城², 刘利强^{1*}

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056000; 2. 中国农业科学院蜜蜂研究所, 资源昆虫产品加工与功能评价实验室, 北京 100093)

摘 要: 红茶菌是一种传统发酵饮品, 以茶糖水为发酵基质, 由醋酸菌、乳酸菌、酵母菌为主要菌群发酵而成, 因其发酵液中含有益生菌、营养成分与丰富的功能活性物质而备受消费者喜爱。目前, 红茶菌的研究与应用在全球范围内大幅上升, 主要市场为北美地区, 产品多样化, 与国外相比, 我国红茶菌产品较少, 种类单一。随着消费者对健康食品需求的不断增加, 红茶菌作为一种具有多种保健功能的饮品, 我国的红茶菌市场前景广阔。本文在查阅文献的基础上, 对国内外红茶菌的发酵工艺、发酵菌种、营养成分与功能活性、新产品研发与应用进行了系统的综述, 并针对当前研究中存在的问题及未来研究方向进行了总结与展望, 为促进我国红茶菌产业新产品开发与商业化提供理论依据。

关键词: 红茶菌; 发酵; 功能活性

Research progress on fermentation technology, strains and functional activities of kombucha

QIAN Xing-Yu^{1,2}, QIAO Jiang-Tao², ZHANG Hong-Cheng², LIU Li-Qiang^{1*}

(1. Hebei University of Engineering, School of Life Sciences and Food Engineering, Handan 056000, China;
2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Apicultural Research, Laboratory of Processing and Function Evaluation of Resource Insect Products, Beijing 100093, China)

ABSTRACT: Kombucha, a traditional fermented beverage, is produced through the fermentation of a tea-sugar solution by a consortium of primarily acetic bacteria, lactic acid bacteria, and yeast. It has garnered immense popularity among consumers due to the presence of probiotics, nutrients, and a plethora of functional bioactive compounds in its fermented liquid. Currently, research and applications of kombucha have significantly escalated on a global scale, with North America being the primary market, characterized by a diverse range of products. In contrast, China's kombucha offerings are relatively scarce and limited in variety compared to foreign markets. Nevertheless, amidst the escalating consumer demand for health-conscious foods, kombucha, as a beverage endowed with multifarious health benefits, holds immense potential for market expansion in China. Based on a thorough review of the literature, this paper provided a systematic overview of kombucha's fermentation processes, microbial strains involved, nutrient composition, functional properties, as well as advancements in new product development and applications, both domestically and internationally. Furthermore, it summarized the current research challenges and anticipates future research directions, aiming to provide a theoretical foundation that can facilitate the development and commercialization of novel kombucha products within the Chinese industry.

KEY WORDS: kombucha; fermentation; functional activity

*通信作者: 刘利强, 博士, 副教授, 主要研究方向为动物源食品中致病微生物的检测与控制。E-mail: 464703755@qq.com

*Corresponding author: LIU Li-Qiang, Ph.D, Associate Professor, Hebei University of Engineering, No.19 Taiji Road, Shangbi Town, Congtai District, Handan 056000, China. E-mail: 464703755@qq.com

0 引言

红茶菌又称康普茶(kombucha), 是一种以茶糖水为发酵基质, 由混合菌群自然发酵而成的传统发酵饮品, 包括发酵液以及发酵液表面的菌膜(symbiotic culture of bacteria and yeast, SCOBY)两部分。红茶菌具有调节肠道菌群、抑菌、抗氧化、抗炎、护肝和预防心血管疾病等多种益生作用^[1-3], 因此又被称为“长生不老茶”及“胃宝”。红茶菌的制作与饮用可最早追溯于我国秦朝, 曾风靡于我国二十世纪八、九十年代。然而由于红茶菌多为家庭作坊生产制作, 容易被杂菌污染, 很快便销声匿迹, 后经民间发展与推广, 红茶菌逐渐传至日本及一些欧洲国家^[1-4]。近些年来, 全球红茶菌消费量迅速增长, 据统计红茶菌生产公司主要分布在欧洲、亚洲和北美, 欧洲有 30 家, 亚洲有 31 家, 北美有 162 家^[5], 预计 2027 年美国与欧洲的市场规模可达到 104.5 亿美元^[6]。2023 年, 全球红茶菌市场价值估值为 35 亿美元, 市场规模预计在 2025 年达到 50 亿美元^[5]。但我国红茶菌产品种类较少, 工业化规模较小, 产业仍处于初始发展阶段。本文综述了国内外红茶菌产品在发酵工艺、发酵菌种、功能活性、红茶菌产品研发与应用 4 个方面的研究进展, 以期对促进我国红茶菌产品开发与产业发展提供参考。

1 红茶菌的发酵工艺

随着经济的发展及人们对于健康的追求, 红茶菌如今已成为最受青睐的功能性饮料之一。目前红茶菌发酵方式主要有自然混菌发酵培养及纯种培养两种, 一般以自然混菌发酵为主, 即直接将已发酵好的发酵液及 SCOBY 加入茶糖水中进行发酵。自然混菌发酵所含微生物较为丰富, 有益于红茶菌风味物质以及营养成分的产生, 但发酵过程中可能由于杂菌及霉菌的存在而导致产品品质下降。纯培养是将筛选出的一种或几种优势菌株组合后, 混合培养进行发酵, 从源头避免发酵过程中的杂菌污染, 提高红茶菌的品质。

近年来, 为了丰富市场以及增加红茶菌的功能活性, 寻找新的发酵底物并开发新型红茶菌饮品成为目前国内外的研究热点。按来源分类, 红茶菌可替代发酵底物主要分为 5 种, 即草药基(如生姜、薄荷、肉桂与金银花等), 水果基(如苹果、樱桃、葡萄、树莓、菠菜与西兰花等), 农用废物基(如玉米丝、大豆乳清、酒厂废水及椰枣糖浆等), 藻类基(如紫菜与海葡萄等)和牛奶基(脱脂牛奶及豆浆等)^[7]。

基质材料、温度、蔗糖含量、茶叶以及是否纯种发酵共同决定了红茶菌的主要特征。传统红茶菌是由红茶、蔗糖以及醋酸菌、乳酸菌与酵母菌组成的混合菌群发酵而成的饮料, 主要发酵基质为红茶。传统红茶菌的发酵过程如图 1 所示, 茶叶或其他发酵基质(1.5~10.0 g/L)加入沸水中

浸泡 10 min, 去除茶叶后加入蔗糖(30~100 g/L), 待温度降至 25℃左右, 加入 1% (V/V)的 SCOBY 及 10% (V/V)发酵液, 用无菌棉覆盖发酵瓶, 静置于室温下有氧发酵 7~14 d^[8-9]。研究发现, 红茶菌的发酵温度越高, 有机酸的浓度则越高, 涩味越高, 甜味越低, 感官品质下降, 因此, 最佳发酵温度控制在 22~28℃为宜^[10-11]。蔗糖含量在一定程度上会影响有机酸的含量, 过低的蔗糖含量会产生涩味及酸味, 可添加与甜味相关的食品(如蜂蜜及水果等)改善低蔗糖红茶菌饮品的风味^[10]。考虑到糖含量的限制及消费者的喜好, 蔗糖含量也不宜过多, 30~100 g/L 最佳。红茶菌发酵过程中会产生大量的挥发性物质, 如酸、醇、酯和酮类等, 随着发酵时间的延长, 这些挥发性成分及感官特性会发生明显变化, 对产品品质产生影响^[12]。综上, 红茶菌的发酵条件具有多样性与不确定性, 难以保证产品的稳定性, 发酵方式及发酵基质等条件均会影响产品品质, 因此, 需进一步研究确定适合大规模生产的发酵条件。

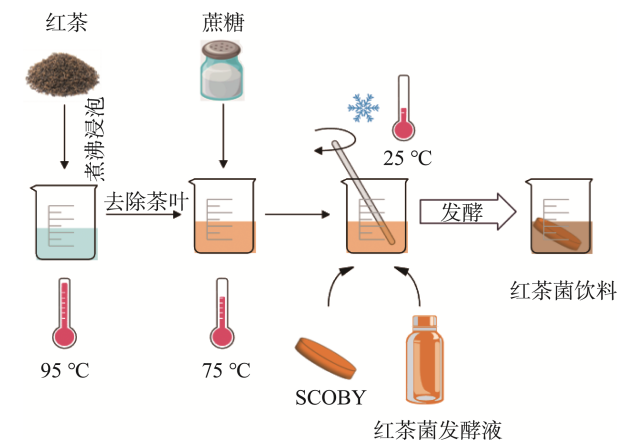


图1 红茶菌发酵过程
Fig.1 Fermentation process of kombucha

2 发酵菌种

在红茶菌的发酵过程中, SCOBY 与发酵液共同构成发酵剂, 不同发酵底物的发酵菌群也不尽相同。这些菌种之间相互依存、相互制约, 共生发酵, 它们的数量、生长关系及组成共同影响着红茶菌中的营养成分。红茶菌的主要发酵过程分为酵母发酵、醋酸发酵和乳酸发酵 3 部分, 代谢过程如图 2 所示。酵母菌将底物中的蔗糖分解为葡萄糖和果糖, 后通过糖酵解途径代谢产生乙醇, 乙醇经醋酸菌中的脱氢酶作用, 产生乙酸。此外, 醋酸菌将葡萄糖转化为葡萄糖酸及葡萄糖醛酸。乳酸菌可通过糖酵解(embden-meyerhof-parnas, EMP)途径或磷酸戊糖途径利用葡萄糖产生乳酸^[13]。有研究表明^[14], 乳酸菌虽然在微生物群落中占比较少, 但对于 d-糖酸-1,4-内酯(d-saccharic

acid-1,4-lactone, DSL)和葡萄糖醛酸的生产具有一定的促进作用。

醋酸菌在红茶菌的微生物群中具有一定的优势性,主要优势菌株为驹形杆菌属(*Komagataeibacter*)、葡糖醋杆菌属(*Gluconobacter*)及醋酸杆菌属(*Acetobacter*)^[9,15]。乳酸菌占比较少,如表 1 所示,主要由乳球菌属(*Lactococcus*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)及明串珠菌属(*Leuconostoc*)等组成^[40],酵母菌主要由酿酒酵母属(*Saccharomyces*)、裂殖酵母属(*Schizosaccharomyces*)、孢圆酵母属(*Torulaspora*)及接合酵母属(*Zygosaccharomyces*)等组成^[9,41]。基于宏基因组学,Andreson 对 16 种不同商业红茶菌进行分析,结果显示丰度最高的属是驹形杆菌属、乳酸杆菌属和芽孢杆菌属 3 种,且在不同商业红茶菌的细菌组成中,醋酸菌主要存在于以红茶为基底发酵的红茶菌中,乳酸菌主要存在于以绿茶为基底发酵的红茶菌中^[42]。WANG 等^[43]在醋酸菌中也发现了潜在益生菌菌株,鉴定为葡糖醋杆菌,具有一定的保肝作用。此外,在乳酸菌中分离出来的益生菌菌种有干酪乳杆菌、德氏乳杆菌、植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌等。WANG 等^[44]对从新西兰不同红茶菌产品中筛选出的 15 株酵母菌进行了生长特性、功能活性及酶活性的测定,毕赤酵母 GBY1 和酿酒酵母 GBY2 均具有高水平细胞表面疏

水性、抗生素耐药性及抗氧化活性等,具有较高的益生菌潜力。

由于红茶菌的发酵方式及发酵基质具有多样性,其发酵后所含的微生物也具有差异性,其中含有一些未知的或未表征的微生物,且有些菌种不属于我国《可用于保健食品的益生菌菌种名单》,因此红茶菌不能被认为是益生菌饮品^[45]。但红茶菌中存在潜在益生菌菌株,因此可以分离、鉴定和表征潜在的益生菌菌株,未来增加至该名单中。

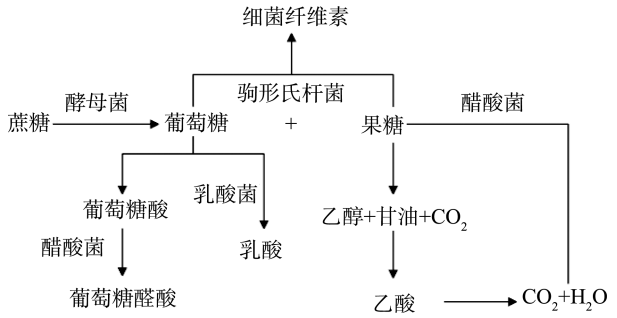


图 2 红茶菌发酵过程中醋酸菌、乳酸菌及酵母菌的代谢过程(改编自参考文献^[14])

Fig.2 Metabolic processes of acetic acid bacteria, lactic acid bacteria and yeasts during fermentation of kombucha (adapted from references^[14])

表 1 红茶菌中的微生物
Table 1 Microorganisms in kombucha

菌种			来源	菌落形态及特征
科	属	种		
醋酸菌	醋酸杆菌属(<i>Acetobacter</i>)	印度尼西亚醋酸杆菌 ^[16]	红茶和绿茶	细胞椭圆至杆状、直或弯,单个、成对或呈链状。菌落呈灰色,部分菌株呈粉红色
		木醋杆菌 ^[17]	红茶	
		醋酸杆菌 ^[17]	红茶	
		巴氏醋杆菌 ^[17-18]	绿茶和红茶	
		巴氏醋杆菌罗旺亚种 ^[19]	绿茶	
		冲绳醋杆菌 ^[19]	红茶和绿茶	
		过氧化醋杆菌 ^[19]	绿茶	
		热带醋杆菌 ^[19]	红茶和绿茶	
		塞内加尔醋杆菌 ^[18]	绿茶	
		果实醋杆菌 ^[18]	绿茶	
		木瓜醋杆菌 ^[20]	绿茶	
		未知 ^[21-24]	绿茶和红茶,生物膜	
	葡糖杆菌属(<i>Gluconobacter</i>)	氧化葡糖杆菌 ^[25-28]	红茶,绿茶,柠檬马鞭草,锦葵,野玫瑰,薄荷	细胞椭圆至杆状,单个或成对,罕见成链。菌落圆形,呈奶酪色,边缘整齐,光滑不透明
		未知 ^[22,27,29]	红茶	
	葡糖醋杆菌属(<i>Gluconacetobacter</i>)	食蔗糖葡糖酸醋杆菌 ^[21]	绿茶和红茶	细胞呈椭圆或杆状,周生鞭毛、可运动或无运动性。菌落呈乳白色,较光滑,圆形不透明
		木葡糖酸醋杆菌 ^[19,21]	绿茶和红茶	
		欧洲葡糖酸醋杆菌 ^[19]	绿茶和红茶	
		汉氏葡糖酸醋杆菌 ^[19]	红茶	
		中间葡糖酸醋杆菌 ^[19]	绿茶和红茶	
		液化葡糖酸醋杆菌 ^[19]	红茶	

表 1(续)

菌种			来源	菌落形态及特征
科	属	种		
乳酸菌	驹形杆菌属(<i>Komagataeibacter</i>)	固氮葡萄糖醋杆菌 ^[27]	红茶	细胞呈杆状, 单个、成对或呈链出现。无运动性, 大多能产纤维素。菌落圆形较小, 表面光滑且湿润, 呈淡黄色
		蜡状葡萄糖杆菌 ^[19]	红茶	
		氧化葡萄糖醋杆菌 ^[18-19]	绿茶和红茶	
		未知 ^[21-23,30]	绿茶、红茶和生物膜	
		居间驹形氏杆菌 ^[18,27,31]	路易波士红茶, 绿茶, 红茶	
		季罗尔驹形氏杆菌 ^[18,23,30-32]	路易波士红茶, 绿茶, 红茶	
		食蔗糖驹形氏杆菌 ^[18,23,31]	路易波士, 绿茶, 红茶, 柠檬, 马鞭草, 锦葵, 野玫瑰, 薄荷	
		木糖驹形氏菌 ^[18,27]	绿茶和红茶	
		汉氏驹形氏菌 ^[18,23,32]	绿茶和红茶	
		欧洲驹形杆菌 ^[18,28]	绿茶和红茶	
	肠球菌属(<i>Enterococcus</i>)	小松杆菌 ^[18]	绿茶	细胞为球形或卵圆形, 单个、成对或短链存在。
		未知 ^[22-23,30-31,33]	路易波士红茶, 绿茶, 红茶	
		屎肠球菌 ^[18]	绿茶	
	乳杆菌属(<i>Lactobacillus</i>)	德氏乳杆菌 ^[34]	绿茶	细胞呈杆状
		嗜酸乳杆菌 ^[17]	红茶	
		甘草乳杆菌 ^[35]	红茶	
		鼠李糖乳杆菌 ^[5]	红茶	
		马里乳杆菌 ^[25]	红茶	
		未知 ^[23, 33-34]	红茶、生物膜	
	乳酪杆菌属(<i>Lactcaseibacillus</i>)	干酪乳杆菌 ^[34]	红茶	幼龄培养物为杆状或楔状, 老培养物为卵圆状或类球状。细胞单个、成对、V 字, 平行杆菌形成栅状
	乳植杆菌属(<i>Lactiplantibacillus</i>)	植物乳杆菌 ^[18]	绿茶	短杆状, 菌落圆形, 边缘整齐, 不透明
	粘液乳杆菌属(<i>Limosilactobacillus</i>)	发酵粘液乳杆菌 ^[17]	红茶	杆状
	乳球菌属(<i>Lactococcus</i>)	未知 ^[21,24]	绿茶, 红茶, 生物膜	细胞球形或卵圆形, 单个、成对或链状。菌落圆形扁平, 无光泽
	液体乳杆菌属(<i>Liquorilactobacillus</i>)	内格尔氏液体乳杆菌 ^[18-19]	红茶和绿茶	杆状
		红条液体乳杆菌 ^[19]	绿茶	
		未知 ^[22]	红茶	
	明串珠菌属(<i>Leuconostoc</i>)	未知 ^[36]	生物膜	细胞球形或卵圆形, 单个、成对或链状, 菌落光滑、圆形、灰白色
	酒球菌属(<i>Oenococcus</i>)	酒类酒球菌 ^[19,34]	红茶和绿茶	球状
	链球菌属(<i>Streptococcu</i>)	未知 ^[21]	红茶和绿茶	细胞球形或卵圆形, 直径 0.5~2.0 μm。液体培养基中, 成对或成链出现
	魏斯氏菌属(<i>Weissella</i>)	未知 ^[33]	红茶	杆状
其他细菌	酸单胞菌属(<i>Acidomonas</i>)	甲醇酸单胞菌 ^[18]	绿茶	杆状, 单个, 罕见成对, 菌落光滑、凸起, 白到稍黄色
	嗜酸菌属(<i>Acidiphilium</i>)	未知 ^[23]	红茶	直或略微杆状, 菌落凸起, 光滑至轻度颗粒状, 米色至淡黄色

表 1(续)

菌种			来源	菌落形态及特征
科	属	种		
	双歧杆菌属(<i>Bifidobacterium</i>)	双歧杆菌 ^[34]	红茶	形态不一致, 常呈弯、棒状和分枝状, 有分叉。菌落凸起, 边缘整齐, 乳色至白色, 柔软
		长双歧杆菌 ^[34]	红茶	
		未知 ^[33,36]	红茶和生物膜	
	伯克氏菌属(<i>Burkholderia</i>)	未知 ^[23,27]	红茶	棒状, 菌落湿润、凸起
	柯林斯氏菌属(<i>Collinsella</i>)	未知 ^[33]	红茶	菌落较大, 湿润
	棒状杆菌属(<i>Corynebacterium</i>)	未知 ^[21]	绿茶和红茶	细胞呈细杆状, 较短, 单个、成对、“V”形或平行栅状排列
	肠杆菌属(<i>Enterobacter</i>)	未知 ^[33]	红茶	杆状, 有鞭毛
	草螺菌属(<i>Herbaspirillum</i>)	未知 ^[27]	红茶	菌落圆形, 表明光滑, 湿润, 乳白色
	嗜盐单胞菌属(<i>Halomonas</i>)	未知 ^[27]	红茶	杆状, 菌落为浅黄色或乳白色
	丙酸杆菌属(<i>Propionibacterium</i>)	未知 ^[21]	绿茶和红茶	呈多形态杆状, 菌落光滑、凸起或粗糙, 颜色多样。
	假单胞菌属(<i>Pseudomonas</i>)	未知 ^[23,32]	红茶	直或微弯杆状。
	罗尔斯通氏菌属(<i>Ralstonia</i>)	皮氏罗尔斯通氏菌 ^[34]	红茶	菌落较小, 乳白色、凸起
	希瓦氏菌属(<i>Shewanella</i>)	海藻希瓦氏菌 ^[27]	红茶	杆状
		鲍希瓦氏菌 ^[27]	红茶	
	发酵单胞菌属(<i>Zymomonas</i>)	未知 ^[22]	红茶	杆状, 单个或成对。
酵母菌	酒香酵母属(<i>Brettanomyces/Dekkera</i>)	布鲁塞尔德克酵母 ^[16,18-19]	绿茶和红茶, 柠檬马鞭草, 锦葵, 野玫瑰和薄荷	独特的细长外形, 2.5~10.0 μm(直径)
		异型德克酵母 ^[19,25,27]	红茶和路易波士红茶	菌落扁平, 表面光滑
		纳氏布雷坦酵母菌 ^[18]	红茶和绿茶	
		未知 ^[21-22,35]	红茶和生物膜	
	假丝酵母属(<i>Candida</i>)	博伊丁假丝酵母 ^[19]	红茶和绿茶	圆形或卵圆形
		近平滑念珠菌 ^[33]	红茶	
		星形假丝酵母 ^[37]	红茶	
		热带假丝酵母 ^[33]	红茶	
		未知 ^[23,27]	红茶	
	德巴利酵母属(<i>Debaryomyces</i>)	汉逊德巴利酵母 ^[33]	红茶	菌落圆形凸起、乳白色
	假囊酵母属(<i>Eremothecium</i>)	阿舒假囊酵母 ^[33]	红茶	细胞球形
	有孢汉逊酵母属(<i>Hanseniaspora</i>)	葡萄汁有孢汉逊酵母 ^[33]	红茶	白色奶油样菌落
		法尔皮有孢汉逊酵母 ^[16,19-20]	红茶和绿茶	
		未知 ^[22]	红茶	
	哈萨克斯坦酵母(<i>Kazachstania</i>)	少孢哈萨克斯坦酵母 ^[33]	红茶	圆形、乳白色菌落
		未知 ^[24]	红茶	
	克鲁维酵母属(<i>Kluyveromyces</i>)	马克斯克鲁维酵母 ^[33]	红茶	菌落圆形光滑, 表面湿润有凸起
	拉钱斯氏酵母属(<i>Lachancea</i>)	发酵拉钱斯氏酵母 ^[33]	红茶或其他基质	-
		克鲁维拉钱斯氏酵母 ^[33]	红茶	
		耐热拉钱斯氏酵母 ^[33]	红茶	
		未知 ^[23]	红茶	
	毕赤酵母属(<i>Pichia</i>)	西方毕赤酵母 ^[27]	红茶	菌落乳白色无光泽

表 1(续)

菌种			来源	菌落形态及特征
科	属	种		
		发酵毕赤酵母 ^[27]	红茶	
		膜醭毕赤酵母 ^[18-19]	红茶和绿茶	
		墨西哥毕赤酵母 ^[33]	红茶	
		库德里阿兹威毕赤酵母 ^[38]	红茶	
		未知 ^[36]	红茶和生物膜	
	红酵母属(<i>Rhodotorula</i>)	胶红酵母 ^[37]	红茶	菌落较黏, 有色素
	酵母菌属(<i>Saccharomyces</i>)	酿酒酵母 ^[18,22-23,33,37]	红茶和绿茶	细胞圆形或卵圆形
		葡萄汁酵母 ^[19]	红茶	
	覆膜孢酵母属(<i>Saccharomycopsis</i>)	扣囊覆膜孢酵母 ^[33]	红茶	菌落表面光滑, 为乳白色或乳黄色
	类酵母属(<i>Saccharomycodes</i>)	路德类酵母 ^[14,18]	绿茶	乳白色, 簇生, 长形, 中间肿胀
	裂殖酵母属(<i>Schizosaccharomyces</i>)	粟酒裂殖酵母 ^[14,18,23,37,39]	红茶和绿茶	奶油色至棕褐色, 块状, 棒状
	原孢酵母属(<i>Sporopachydermia</i>)	乳状原孢酵母 ^[33]	红茶	-
	亚罗酵母属(<i>Yarrowia</i>)	解脂耶氏酵母 ^[27]	红茶	菌落圆形、凸起、乳白色
	接合酵母属(<i>Zygosaccharomyces</i>)	拜尔接合酵母 ^[14,18,37]	红茶和绿茶	白色至奶油色菌落, 顶部带褐色, 圆柱形或椭圆形, (3.5~6.0) $\mu\text{m} \times (4.5 \sim 11.5) \mu\text{m}$ 大小
		鲁氏接合酵母 ^[14,18]	绿茶	白色到奶油色平滑的菌落, 圆形或椭圆形
		未知 ^[23-24,36]	绿茶和红茶, 生物膜, 柠檬马鞭草, 锦葵, 野玫瑰和薄荷	细胞圆形、卵圆形或细长形
	接合有孢酵母属(<i>Zygorhizula</i>)	佛罗伦萨接合有孢酵母 ^[19]	红茶和绿茶	-
	接合拟威尔酵母属(<i>Zygowillipsis</i>)	加利福尼亚接合拟威尔酵母 ^[33]	红茶	菌落扁平, 乳白色

注: -为文献未提及该菌菌落特征。

3 红茶菌的营养成分与生理功能

迄今为止, 已在红茶菌中发现多种营养成分, 如有机酸(乙酸、葡萄糖酸、葡萄糖醛酸、琥珀酸、DSL、乳酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸等)^[46-47], 酚类化合物(儿茶素、没食子酸、咖啡因、茶黄素、茶红素等)^[48], 维生素 C、维生素 B 族复合物(B₁、B₂、B₆、B₇、B₁₂)^[49], 酶(α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶、植酸酶、单宁酶、果胶酶、木聚糖酶等)^[9,49-50]等。

红茶菌的主要生理功能如下。

3.1 调节肠道菌群

红茶菌中的结构复杂的酚酸类成分(寡聚体和聚合物结构)在结肠时经代谢生成的生物活性分子能够发挥类似益生元的作用, 通过促进有益菌的生长和抑制病原菌的生长调节肠道菌群^[51-52]。在 JUNG 等^[53]的研究中, 食用红茶菌后, 肠道中的乳酸菌丰度增加, 有利于抗炎及预防非酒精性脂肪肝(nonalcoholic fatty liver disease, NAFLD)。多酚化合物有利于肠道中嗜黏蛋白阿克曼菌(*Akkermansia*

muciniphila)生长, 降低肠道通透性^[54]。一些细菌产生的发酵产物(主要是短链脂肪酸)有利于机体的细胞代谢和肠道免疫系统中结肠细胞、中性粒细胞与 T 细胞的生长, 维护肠道屏障功能^[55]。此外, 红茶菌的许多其他有益作用都与肠道菌群密切相关, 如降血糖、抗炎及缓解肥胖等。在 XU 等^[56]的研究中, 对小鼠注射高糖、高脂肪饮食联合链脲霉素(streptozocin, STZ)诱导 2 型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM), 经红茶菌干预 4 周后, 肠道中产短链脂肪酸的细菌丰度增加, 革兰氏阴性菌和致病菌的丰度降低, 调节了胰岛 β 细胞功能, 减少了肠道屏障损伤, 起到降血糖的作用。虽然红茶菌可通过调节肠道菌群及改善肠道环境等维护肠道健康, 但目前仍处于初步研究阶段, 未来随着进一步的研究, 红茶菌调节肠道菌群的活性将会得到进一步的开发与利用。

3.2 抑菌作用

红茶菌的抑菌作用主要分为两种途径, (1)由益生菌释放抑菌活性物质抑制致病菌的生长, 如细菌素及抗菌肽等,

(2)通过红茶菌发酵产生的抑菌活性代谢物抑制微生物生长,如乙酸、儿茶素及异鼠李素等^[57]。

美国农业食品化学杂志的研究表明,以未发酵茶和醋酸作对照,红茶菌对于多种病原菌均有明显抑菌效果,包括金黄色葡萄球菌、志贺氏菌、大肠杆菌、嗜水气单胞菌、肠炎耶尔森氏菌、铜绿假单胞菌、阴沟肠杆菌、表皮葡萄球菌、空肠弯曲菌、肠炎沙门氏菌、鼠伤寒沙门氏菌、蜡样芽孢杆菌、幽门螺杆菌和单核细胞增生李斯特菌^[58]。有机酸是红茶菌中主要的抑菌物质,能够通过诱导细胞质酸化破坏细胞达到抑菌目的^[59]。酚类物质虽然是红茶菌中的主要抗氧化活性物质,但在 BARBOSA 等^[41]的研究中,红茶菌中的没食子酸和咖啡因对微生物的生长有抑制作用,BHATTACHARYA 等^[60]利用高效液相色谱法检测到的儿茶素和异鼠李素是红茶菌多酚组分中的主要抑菌物质,这表明酚类化合物也具有一定的抑菌活性。综上所述,红茶菌具有显著的抑菌作用,国内对于红茶菌的抑菌性研究较少,未来应进一步研究红茶菌的抑菌作用,为食品保存、临床医疗及农业等领域的应用提供更多可能。

3.3 抗氧化活性

已有研究证明,茶叶中的茶多酚具有抗氧化特性,能够有效清除活性氧和自由基,且红茶菌中的红茶为发酵茶,其中茶鞣酸氧化形成的茶黄素与绿茶中的儿茶素具有相似的抗氧化能力^[61-62]。除多酚外,红茶菌中 *L*-抗坏血酸及 DSL 也具有抗氧化特性。DSL 为 *D*-葡萄糖二酸的衍生物,具有减少一些细胞的氧化损伤能力^[63]。此外,葡萄糖醛酸是合成 *L*-抗坏血酸的前体物质,因此葡萄糖醛酸也会增加红茶菌的抗氧化活性^[64]。综上,红茶菌中含有丰富的抗氧化物质,是一种强大的抗氧化剂,有助于降低患病风险,促进人体健康,这些特性使得红茶菌在食品、保健领域具有较大的应用前景。

3.4 抗炎作用

红茶菌能够下调促炎细胞因子的水平并通过调控肠道菌群干预病原体的定植发挥抗炎作用^[65]。WANG 等^[66]发现,对于脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)诱导的小鼠脓毒症,红茶菌能够降低肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)和白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)的水平,减轻组织病理学损伤,抑制 LPS 诱导的脓毒症小鼠 NF- κ B 转录因子信号传导,表现出较好抗炎活性,为红茶菌在脓毒症防治中的潜在应用提供了依据。另一项研究以 LPS 诱导小鼠的巨噬细胞 RAW 264.7,由卡斯卡拉制备的红茶菌能够显著抑制 LPS 诱导的巨噬细胞中一氧化氮(NO)的形成,表现出抗炎作用^[67]。目前,对红茶菌的抗炎作用已有研究,但具体发挥作用的活性成分及作用机制尚不明确。

3.5 保肝作用

WANG 等^[68]研究发现,红茶菌对由乙酰氨基酚诱导

的小鼠肝损伤有一定的保肝作用,且保肝作用与 DSL 含量呈正相关关系。葡萄糖醛酸也有降解肝脏毒素的作用,这是由于葡萄糖醛酸能够与毒素分子结合从而消除机体中的毒素。以生理盐水及红茶菌饲喂非酒精性脂肪肝小鼠,红茶菌能够通过影响脂质代谢来保护肝细胞免受脂质毒性,并减轻炎症和纤维化,减轻小鼠的肝损伤症状^[69]。另外一项研究表明,红茶菌可以通过抗氧化剂(多酚、类黄酮、DSL 等)消除由自由基诱导剂(叔丁基过氧化氢)诱导产生的过量自由基,从而可以稳定细胞中的抗氧化系统来避免化学诱导的肝损伤^[70]。红茶菌是一种潜在的保肝剂,但由于红茶菌中的保肝成分主要由微生物代谢产生且尚未实现标准化及商业化生产,因此其内含有的保肝成分并不稳定,且目前红茶菌的保肝活性的作用机制尚不清楚,未来仍需对这方面进行深入研究。

4 红茶菌产品研发及应用

红茶菌发酵条件与发酵基质的可控性有利于开发新型红茶菌产品,以新型底物发酵的红茶菌不仅丰富了红茶菌产品风味,还在一定程度上增强了生物活性,为不同需求的人群提供更多选择^[7]。XIONG 等^[71]开发了一种以竹叶和桑叶为基质的新型红茶菌,两种红茶菌产品均具有较好的抗氧化活性和多种生物活性化合物,且不含咖啡因,为咖啡因敏感人群提供更多选择。有研究表明^[72],姜黄红茶菌产品有助于刺激特定免疫细胞的产生,增加抗炎介质,从而减轻小鼠炎症。ZHANG 等^[73]以枸杞为底物发酵红茶菌,研究结果表明该新型红茶菌的抗氧化活性及抗菌活性均显著增强。此外,还可以向红茶菌中加入菠萝、猕猴桃或苹果等水果,不仅可以增加特殊的水果风味,还能提升产品口感。

此外,由于红茶菌中含有丰富的益生菌,可将红茶菌应用于其他发酵食品中。HRNJEZ 等^[74]以红茶菌发酵液作为新型发酵剂生产红茶菌发酵乳,结果表明红茶菌发酵乳不仅具有清爽的口感及独特的香气,抗氧化能力及血管紧张素转换酶抑制活性也显著高于传统发酵乳,丰富了发酵乳产品的种类。在 KAYA 等^[75]的研究中,以红茶菌发酵液代替水发酵面包后,不仅丰富了面包的风味及营养价值,抗氧化活性及抑菌作用较传统面包都显著增加。

细菌纤维素(bacterial cellulose, BC)是一种由红茶菌发酵而产生的大分子物质,具有预防便秘、抗氧化、降低胆固醇及吸附食物中有毒物质的作用^[76]。BC 在食品工业中又被称为“纳塔(Nata)”,可直接食用,提高饱腹感及控制食欲,或作为一种食品添加剂应用到食品加工中,如甜点、沙拉、水果鸡尾酒及水果果冻等,是一种理想的膳食纤维^[77]。红茶菌的新品研发不仅局限于食品、保健品领域,其丰富的功能活性及附加产物 BC 突出的物理化学特性,

如高聚合度、良好的持水性、高热稳定性等使得红茶菌在生物与生物医药领域均具有更大的潜在价值。

5 结束语

目前, 已有充分的证据表明, 红茶菌因其营养成分及功能活性在预防并辅助治疗某些疾病方面展现出巨大的潜力, 备受消费者青睐。但对于红茶菌禁忌症的研究还处于起步阶段, 尚未进行人体试验, 对人体存在潜在的健康风险。这可能与发酵条件不卫生(大多为自制红茶菌)、发酵时间过长、不适当的发酵容器或错误选择发酵菌群有关。因此, 未来可通过控制相关发酵参数并结合现代生物技术, 确定最佳发酵条件及适合大规模生产的发酵条件, 探讨发酵菌群、潜在益生成分与生物活性之间的联系, 确定其功能性饮料的产品定位, 明确红茶菌饮品的健康性与潜在风险。同时, 制定并完善红茶菌相关的标准与法规, 保证红茶菌质量与生产安全, 为我国红茶菌产业的研发与标准化生产提供理论支撑。

参考文献

- [1] SU J, TAN Q, WU S, *et al.* Application of kombucha fermentation broth for antibacterial, antioxidant, and anti-inflammatory processes [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(18): 13984.
- [2] ESATBEYOGLU T, AYDIN SS, SUBASI BG, *et al.* Additional advances related to the health benefits associated with kombucha consumption [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2022, 20: 1–18.
- [3] COELHO RMD, DE-ALMEIDA AL, AMARAL RQGD, *et al.* Kombucha: Review [J]. *Int J Gastron Food S*, 2020, 22: 100272.
- [4] 涂传海. 红茶菌发酵黄浆水的代谢组与宏基因组分析及一株耐高渗酵母的益生特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
TU CH. Metabolomic and macro genomic analyses of kombucha-fermented yellow slurry water and probiotic characterization of a hyperosmotic-tolerant yeast strain [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [5] KIM J, ADHIKARI K. Current trends in kombucha: Marketing perspectives and the need for improved sensory research [J]. *Beverages*, 2020. DOI: 10.3390/beverages6010015
- [6] 刘思琪, 樊璐瑶, 王硕, 等. 红茶菌功能性微生物开发与利用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(11): 388–395.
LIU SQ, FAN LY, WANG S, *et al.* Advances in the development and utilization of functional microorganisms in kombucha [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2024, 45(11): 388–395.
- [7] LIU Y, ZHENG Y, YANG T, *et al.* Functional properties and sensory characteristics of kombucha analogs prepared with alternative materials [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 129: 608–616.
- [8] ESATBEYOGLU T, SARIKAYA AS, GULTEKIN SB, *et al.* Additional advances related to the health benefits associated with kombucha consumption [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2024, 64(18): 6102–6119.
- [9] ICEN H, CORBO MR, SINIGAGLIA M, *et al.* Microbiology and antimicrobial effects of kombucha, a short overview [J]. *Food Biosci*, 2023, 56: 103270.
- [10] COHEN G, SELA DA, NOLDEN AA. Sucrose concentration and fermentation temperature impact the sensory characteristics and liking of kombucha [J]. *Foods*, 2023, 12(16): 3116.
- [11] NEFFE-SKOCINSKA K, SIOŃEK B, SCIBISZ I, *et al.* Acid contents and the effect of fermentation condition of kombucha tea beverages on physicochemical, microbiological and sensory properties [J]. *Cyta-J Food*, 2017, 15(4): 601–607.
- [12] DARTORA B, HICKERT LR, FABRICIO MF, *et al.* Understanding the effect of fermentation time on physicochemical characteristic, sensory attributes, and volatile compounds in green tea kombucha [J]. *Food Res Int*, 2023, 174: 113569.
- [13] ANTOLAK H, PIECHOTA D, KUCHARSKA A. Kombucha tea—a double power of bioactive compounds from tea and symbiotic culture of bacteria and yeasts (SCOBY) [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2021, 10(10): 1541.
- [14] WANG B, RUTHERFURD-MARKWICK K, ZHANG X, *et al.* Kombucha: Production and microbiological research [J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3456.
- [15] 李如意, 陈建新, 汪芳, 等. 4 种特色红茶菌发酵液感官品质、理化特性及菌群结构比较研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3197–3204.
LI RY, CHEN JX, WANG F, *et al.* Comparative study on sensory quality, physicochemical properties and community structure of 4 kinds of characteristic Kombucha fermentation broth [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(8): 3197–3204.
- [16] TRAN T, BILLET K, TORRES-COBOS B, *et al.* Use of a minimal microbial consortium to determine the origin of kombucha flavor [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 836617.
- [17] AL-MOHAMMADI AR, ISMAIEL AA, IBRAHIM RA, *et al.* Chemical constitution and antimicrobial activity of kombucha fermented beverage [J]. *Molecules*, 2021, 26(16): 5026.
- [18] LANDIS EA, FOGARTY E, EDWARDS JC, *et al.* Microbial diversity and interaction specificity in kombucha tea fermentations [J]. *mSystems*, 2022, 7(3): e0015722.
- [19] COTON M, PAWTOWSKI A, TAMINIAU B, *et al.* Unraveling microbial ecology of industrial-scale kombucha fermentations by metabarcoding and culture-based methods [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2017. DOI: 10.1093/femsec/fix048
- [20] TRAN T, GRANDVALET C, WINCKLER P, *et al.* Shedding light on the formation and structure of kombucha biofilm using two-photon fluorescence microscopy [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 725379.
- [21] DE-FILIPPIS F, TROISE AD, VITAGLIONE P, *et al.* Different temperatures select distinctive acetic acid bacteria species and promotes organic acids production during kombucha tea fermentation [J]. *Food Microbiol*, 2018, 73: 11–16.
- [22] FABRICIO MF, MANN MB, KOTHE CI, *et al.* Effect of freeze-dried kombucha culture on microbial composition and assessment of metabolic dynamics during fermentation [J]. *Food Microbiol*, 2022, 101: 103889.
- [23] GOES-NETO A, KUKHARENKO O, ORLOVSKA I, *et al.* Shotgun metagenomic analysis of kombucha mutualistic community exposed to Mars-like environment outside the international space station [J]. *Environ Microbiol*, 2021, 23(7): 3727–3742.
- [24] MARSH AJ, O’SULLIVAN O, HILL C, *et al.* Sequence-based analysis of the bacterial and fungal compositions of multiple kombucha (tea fungus)

- samples [J]. Food Microbiol, 2014, 38: 171–178.
- [25] GRASSI A, CRISTANI C, PALLA M, *et al.* Storage time and temperature affect microbial dynamics of yeasts and acetic acid bacteria in a kombucha beverage [J]. Int J Food Microbiol, 2022, 382: 109934.
- [26] PODOLICH O, ZAETS I, KUKHARENKO O, *et al.* Kombucha multimicrobial community under simulated spaceflight and martian conditions [J]. Astrobiology, 2017, 17(5): 459–469.
- [27] REVA ON, ZAETS IE, OVCHARENKO LP, *et al.* Metabarcoding of the kombucha microbial community grown in different microenvironments [J]. AMB Express, 2015, 5(1): 124.
- [28] VILLARREAL-SOTO SA, BOUAJILA J, PACE M, *et al.* Metabolome-microbiome signatures in the fermented beverage, kombucha [J]. Int J Food Microbiol, 2020, 333: 108778.
- [29] CHAKRAVORTY S, BHATTACHARYA S, CHATZINOTAS A, *et al.* Kombucha tea fermentation: Microbial and biochemical dynamics [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 220: 63–72.
- [30] ARIKAN M, MITCHELL AL, FINN RD, *et al.* Microbial composition of kombucha determined using amplicon sequencing and shotgun metagenomics [J]. J Food Sci, 2020, 85(2): 455–464.
- [31] GAGGIA F, BAFFONI L, GALIANO M, *et al.* Kombucha beverage from green, black and rooibos teas: A comparative study looking at microbiology, chemistry and antioxidant activity [J]. Nutrients, 2018, 11(1): 1.
- [32] LEE I, BARH D, PODOLICH O, *et al.* Metagenome-assembled genome sequences obtained from a reactivated kombucha microbial community exposed to a mars-like environment outside the international space station [J]. Microbiol Resour Announc, 2021, 10(36): e0054921.
- [33] CHAKRAVORTY S, BHATTACHARYA S, CHATZINOTAS A, *et al.* Kombucha tea fermentation: Microbial and biochemical dynamics [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 220: 63–72.
- [34] LEE KR, JO K, RA KS, *et al.* Kombucha fermentation using commercial kombucha pellicle and culture broth as starter [J]. Food Sci Tech-brazil, 2021. DOI: 10.1590/FST.70020
- [35] YANG J, LAGISHETTY V, KURNIA P, *et al.* Microbial and chemical profiles of commercial kombucha products [J]. Nutrients, 2022, 14(3): 670.
- [36] WATAWANA MI, JAYAWARDENA N, GUNAWARDHANA CB, *et al.* Enhancement of the antioxidant and starch hydrolase inhibitory activities of king coconut water (*Cocos nucifera* var. *aurantiaca*) by fermentation with kombucha ‘tea fungus’ [J]. Int J Food Sci Technol, 2016, 51(2): 490–498.
- [37] TEOH AL, HEARD G, COX J. Yeast ecology of kombucha fermentation [J]. Int J Food Microbiol, 2004, 95(2): 119–126.
- [38] TSILO PH, BASSON AK, NTOMBELA ZG, *et al.* Isolation and optimization of culture conditions of a bioflocculant-producing fungi from kombucha tea SCOBY [J]. Microbiol Res-Italy, 2021, 12(4): 950–966.
- [39] AL-MOHAMMADI A, ISMAIEL AA, IBRAHIM RA, *et al.* Chemical constitution and antimicrobial activity of kombucha fermented beverage [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(16): 5026.
- [40] VILLARREAL-SOTO SA, BEAUFORT S, BOUAJILA J, *et al.* Understanding kombucha tea fermentation: A review [J]. J Food Sci, 2018, 83(3): 580–588.
- [41] BARBOSA CD, UETANABARO APT, SANTOS WCR, *et al.* Microbial-physicochemical integrated analysis of kombucha fermentation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 148: 111788.
- [42] ANDRESON M, KAZANTSEVA J, KULDJARV R, *et al.* Characterization of chemical, microbial and sensory profiles of commercial kombuchas [J]. Int J Food Microbiol, 2022, 373: 109715.
- [43] WANG Y, JI B, WU W, *et al.* Hepatoprotective effects of kombucha tea: Identification of functional strains and quantification of functional components [J]. J Sci Food Agric, 2014, 94(2): 265–272.
- [44] WANG B, RUTHERFURD-MARKWICK K, LIU N, *et al.* Evaluation of the probiotic potential of yeast isolated from kombucha in New Zealand [J]. Curr Res Food Sci, 2024, 8: 100711.
- [45] HILL C, GUARNER F, REID G, *et al.* Expert consensus document. the international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic [J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2014, 11(8): 506–514.
- [46] KAEWKOD T, BOVONSOMBUT S, TRAGOOLPUA Y. Efficacy of kombucha obtained from green, oolong, and black teas on inhibition of pathogenic bacteria, antioxidation, and toxicity on colorectal cancer cell line [J]. Microorganisms, 2019, 7(12): 700.
- [47] TEIXEIRA OJ, MACHADO DCF, GONCALVEZ DST, *et al.* Green tea and kombucha characterization: Phenolic composition, antioxidant capacity and enzymatic inhibition potential [J]. Food Chem, 2023, 408: 135206.
- [48] CARDOSO RR, NETO RO, DOS SDC, *et al.* Kombuchas from green and black teas have different phenolic profile, which impacts their antioxidant capacities, antibacterial and antiproliferative activities [J]. Food Res Int, 2020, 128: 108782.
- [49] GERARIS KI, KARANTONIS HC, GIAOURIS E, *et al.* Kombucha fermentation of Olympus mountain tea (*Sideritis scardica*) sweetened with thyme honey: Physicochemical analysis and evaluation of functional properties [J]. Foods, 2023, 12(18): 3496.
- [50] WANG X, WANG D, WANG H, *et al.* Chemical profile and antioxidant capacity of kombucha tea by the pure cultured kombucha [J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 168(10): 113931.
- [51] COSTA M, DIAS ML, DUARTE V, *et al.* Kombuchas from green and black tea modulate the gut microbiota and improve the intestinal health of wistar rats fed a high-fat high-fructose diet [J]. Nutrients, 2022, 14(24): 5234.
- [52] GOWD V, KARIM N, SHISHIR MRI, *et al.* Dietary polyphenols to combat the metabolic diseases via altering gut microbiota [J]. Trends Food Sci Technol, 2019, 93: 81–93.
- [53] JUNG Y, KIM I, MANNAA M, *et al.* Effect of kombucha on gut-microbiota in mouse having non-alcoholic fatty liver disease [J]. Food Sci Biotechnol, 2019, 28(1): 261–267.
- [54] XU Y, WANG N, TAN HY, *et al.* Function of *Akkermansia muciniphila* in obesity: Interactions with lipid metabolism, immune response and gut systems [J]. Front Microbiol, 2020, 11: 219.
- [55] SOARES IF, DE-LIMA MA, LUCARINI M, *et al.* The kombucha ingestion benefits on the intestinal microbiota [J]. Rend Lincei-Sci Fis, 2023, 34(3): 833–841.
- [56] XU S, WANG Y, WANG J, *et al.* Kombucha reduces hyperglycemia in type 2 diabetes of mice by regulating gut microbiota and its metabolites [J]. Foods, 2022, 11(5): 754.

- [57] AL-MOHAMMADI A, ISMAIEL AA, IBRAHIM RA, *et al.* Chemical constitution and antimicrobial activity of kombucha fermented beverage [J]. *Molecules*, 2021, 26(16): 5026.
- [58] SREERAMULU G, ZHU Y, KNOL W. Kombucha fermentation and its antimicrobial activity [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(6): 2589–2594.
- [59] LUDOVICO P, SANSONETTY F, SILVA MT, *et al.* Acetic acid induces a programmed cell death process in the food spoilage yeast *Zygosaccharomyces bailii* [J]. *Fems Yeast Res*, 2003, 3(1): 91–96.
- [60] BHATTACHARYA D, BHATTACHARYA S, PATRA MM, *et al.* Antibacterial activity of polyphenolic fraction of kombucha against enteric bacterial pathogens [J]. *Curr Microbiol*, 2016, 73(6): 885–896.
- [61] JAYASEKERA S, MOLAN AL, GARG M, *et al.* Variation in antioxidant potential and total polyphenol content of fresh and fully-fermented sri lankan tea [J]. *Food Chem*, 2011, 125(2): 536–541.
- [62] LEUNG LK, SU YL, CHEN RY, *et al.* Theaflavins in black tea and catechins in green tea are equally effective antioxidants [J]. *J Nutr*, 2001, 131(9): 2248–2251.
- [63] SALUK-JUSZCZAK J, OLAS B, NOWAK P, *et al.* Protective effects of d-glucaro-1,4-lactone against oxidative modifications in blood platelets [J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2008, 18(6): 422–428.
- [64] LEAL JM, SUAREZ LV, JAYABALAN R, *et al.* A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites [J]. *Cyta-J Food*, 2018, 16(1): 390–399.
- [65] LIU Z, LIN N, FANG H, *et al.* Enteric dysbiosis is associated with sepsis in patients [J]. *FASEB J*, 2019, 33(11): 12299–12310.
- [66] WANG P, FENG Z, SANG X, *et al.* Kombucha ameliorates LPS-induced sepsis in a mouse model [J]. *Food Funct*, 2021, 12(20): 10263–10280.
- [67] SALES AL, IRIONDO-DEHOND A, DEPAULA J, *et al.* Intracellular antioxidant and anti-inflammatory effects and bioactive profiles of coffee cascara and black tea kombucha beverages [J]. *Foods*, 2023, 12(9): 1905.
- [68] WANG Y, JI B, WU W, *et al.* Hepatoprotective effects of kombucha tea: Identification of functional strains and quantification of functional components [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(2): 265–272.
- [69] LEE C, KIM J, WANG S, *et al.* Hepatoprotective effect of kombucha tea in rodent model of nonalcoholic fatty liver disease/nonalcoholic steatohepatitis [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(9): 2369.
- [70] BHATTACHARYA S, GACHHUI R, SIL PC. Hepatoprotective properties of kombucha tea against TBHP-induced oxidative stress via suppression of mitochondria dependent apoptosis [J]. *Pathophysiology*, 2011, 18(3): 221–234.
- [71] XIONG R, WU S, CHENG J, *et al.* Antioxidant activities, phenolic compounds, and sensory acceptability of kombucha-fermented beverages from bamboo leaf and mulberry leaf [J]. *Antioxidants*, 2023, 12(8): 1573.
- [72] ZUBAIDAH E, DEA EC, RAHAYU AP, *et al.* Enhancing immunomodulatory properties of Javanese turmeric (*Curcuma xanthorrhiza*) kombucha against diethylnitrosamine in male Balb/c mice [J]. *Process Biochem*, 2023, 133: 303–308.
- [73] ZHANG S, TANG Y, CHEN J. Changes in functional components and biological activity of *Lycium barbarum* after fermentation with kombucha SCOBY [J]. *J Food Process Pres*, 2022. DOI: 10.1111/jfpp.16758
- [74] HRNJEZ D, VASTAG Z, MILANOVIC S, *et al.* The biological activity of fermented dairy products obtained by kombucha and conventional starter cultures during storage [J]. *J Funct Foods*, 2014, 10: 336–345.
- [75] KAYA Z, ASIR Y. Assessment of instrumental and sensory quality characteristics of the bread products enriched with kombucha tea [J]. *Int J Gastron Food S*, 2022, 29: 100562.
- [76] 吕敏, 赵文韬, 龚建萍, 等. 细菌纤维素在食品工业中的应用研究进展[J]. *现代食品*, 2021, (16): 23–28.
- LV G, ZHAO WT, GONG JP, *et al.* Research progress on the application of bacterial cellulose in food industry [J]. *Mod Food*, 2021, (16): 23–28.
- [77] 陆胜民, 贾静静, 杨颖. 细菌纤维素发酵工艺与应用研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2011, 47(1): 27–31.
- LU SM, JIA JJ, YANG Y. Research progress on fermentation technology and application of the bacterial cellulose [J]. *Sichuan Food Ferment*, 2011, 47(1): 27–31.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)

作者简介



钱星宇, 硕士研究生, 主要研究方向为食品微生物。

E-mail: 1760380914@qq.com



刘利强, 博士, 副教授, 主要研究方向为动物源食品中致病微生物的检测与控制。

E-mail: 464703755@qq.com